Hubbles Nachfolger: Das James-Webb-Weltraumteleskop

Abbildung 1: Modell des James-Webb-Weltraumteleskops (JWST) in Originalgröße (Bild: NASA).

Im Weltraum herrschen extreme Umweltbedingungen. Materialien, die für Satellitenmissionen verwendet werden sollen, müssen daher besonderen Anforderungen genügen. Bereits im Labor zu Hause (Tiefkühltruhe und sonnenbeschienene Fensterbank) lässt sich zeigen, dass verschiedene Stoffe auf Temperaturdifferenzen unterschiedlich reagieren.

Weltraumteleskope kann man nicht beliebig groß bauen, da die Schubkraft der zur Beförderung ins All zur Verfügung stehenden Raketen begrenzt ist. Mit Hilfe der Raketengleichung überlegen wir, ob man auch mit einstufigen Raketen in den Weltraum gelangen kann. Die dazu notwendige Fluchtgeschwindigkeit wird hergeleitet und mögliche Satellitenbahnen werden beschrieben. Darüberhinaus wird erklärt, warum man Raumfahrzeuge wie das Space Shuttle nicht einfach nachbauen kann.

Um das Licht der ersten Galaxien zu beobacnten, muss man Kameras verwenden, die für Wärmestrahlung empfindlich sind. Denn das Licht dieser Objekte ist in den infraroten Spektralbereich “verschoben”. Wir betrachten den Parameter z, mit dem diese Rotverschiebung gemessen wird.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Wärmelehre, Gravitation, Dynamik, Kreisbewegung	Temperaturdifferenzen, Materialeigenschaften, Raketengleichung, Fluchtgeschwindigkeit, Kreisgeschwindigkeit, Parabelbahn, Zentripetalkraft, Gravitationskraft
Astronomie	Raumfahrt, Kosmologie, Strahlung, Gravitation	Satellitenbahnen, Kosmologische Rotverschiebung, elektromagnetisches Spektrum

Inhaltsverzeichnis

1 Das Verhalten von Materialien bei verschiedenen Temperaturen

Im häuslichen Testlabor lassen sich im Sommer Temperaturdifferenzen von gut 50 ° Celsius erzeugen. Mit Hilfe einer Tiefkühltruhe kann man Gegenstände auf etwa −20 ° Celsius abkühlen. An einem Platz an der Sonne auf der Fensterbank erreicht man an einem heißen Tag problemlos Temperaturen von 30 ° Celsius und mehr. Dieser Temperaturunterschied reicht aus, um zumindest ansatzweise zu zeigen, dass sich Stoffe bei verschiedenen Temperaturen bzw. größeren Temperaturdifferenzen unterschiedlich verhalten. Als Testobjekte verwenden wir folgende Materialien:

1.) Eiswürfel

2.) Vollmilchschokolade

3.) Bratwurst (Nur für Versuch 2 und 3 !!!)

4.) Erdbeere

5.) Verschiedene Sorten von Plastik

- ⋆ Tiefkühltaugliche Plastikschüssel
- ⋆ Plastikschüssel, die nicht zum Einfrieren geeignet ist
- ⋆ Plastikschale, die als Verpackung für Frischobst ausgedient hat

Versuch 1:

Wir legen die aus unterschiedlichen Materialien bestehenden Testobjekte für ein bis zwei Stunden in die Sonne und untersuchen dann ihren Zustand bzw. ihr Verhalten im Hinblick auf ihre Biegsamkeit.

Egebnis:

- Der Eiswürfel ist geschmolzen.
- Die Schokolade ist sehr weich geworden oder hat je nach Außentemperatur ebenfalls damit begonnen, sich zu verflüssigen.
- Die Erdbeere hat sich nicht sonderlich verändert.
- Die beiden Plastikschüsseln (tiefkühl- bzw. nicht tiefkühlgeeignet) kann man mit leichtem Druck problemlos etwas verbiegen.
- Die Plastikschale lässt sich sehr gut verbiegen.

Versuch 2:

Nachdem sich die Testobjekte abgekühlt haben, legen wir sie über Nacht in die Tiefkühltruhe. Am nächsten Tag betrachten wir wieder ihren Zustand und beobachten, wie sie reagieren, wenn man versucht, sie zu verbiegen.

Egebnis:

- Das in der Sonne geschmolzene Eis ist wieder gefroren und hart.
- Die Schokolade ist fest geworden und bricht beim Versuch, sie zu verbiegen.
- Die Bratwurst ist ebenfalls fest gefroren und bricht beim Versuch, sie zu verbiegen.
- Auch die Erdbeere ist hart gefroren.
- Die tiefkühltaugliche Plastikschüssel lässt sich mit leichtem Druck problemlos etwas verbiegen.
- Die nicht zum Einfrieren geeignete Plastikschüssel kann man ebenfalls leicht verbiegen. Im Vergleich zur tiefkühlgeeigneten Plastikschüssel wirkt sie jedoch ansatzweise etwas spröde.
- Die Plastikschale ist gut zu verbiegben, wirkt aber dennoch etwas spröde.

Versuch 3:

Wir legen die Testobjekte wieder für einige Zeit in die Sonne und lassen sie auftauen.

Egebnis:

Im Prinzip erhält man dasselbe Ergebnis wie bei Versuch 1. Nur die Erdbeere ist matschig geworden und lässt sich nicht wieder in den ursprünglichen Zustand überführen. Die Bratwurst taut ebenfalls wieder auf, hält ihre Form und sollte möglichst bald gegessen werden.

Wiederholt man Versuch 1 und 2 mit den beiden Plastikschüsseln (tiefkühl- bzw. nicht tiefkühlgeeignet) sehr oft, so wird man mit der Zeit feststellen, dass die nicht zum Einfrieren taugliche Schüssel allmählich immer spröder wird und beim Versuch, sie zu verbiegen, schließlich bricht.

Mit diesen einfachen Möglichkeiten lässt sich folglich demonstrieren, dass unterschiedliche Materialien auf Temperaturunterschiede tatsächlich andersartig und zum Teil sehr deutlich reagieren. Damit kann man leicht verstehen, dass nicht alle Stoffe weltraumtauglich sind und den an sie gestellten Anforderungen genügen, wenn man sie bis auf -240° Celsius und weiter abgekühlt.

2 Raketen

Einen Satelliten oder ein Weltraumteleskop kann man nicht beliebig groß und damit auch nicht beliebig schwer bauen. Der Grund ist ganz einfach: Satelliten müssen ins All befördert werden. Die dafür zur Verfügung stehenden Raketen können aber nur eine begrenzte Nutzlast tragen. Es gilt: Je schwerer die Nutzlast ist, desto antriebsstärker muss die Rakete sein. Oder anders ausgedrückt: Je größer die zu befördernde Masse ist, desto mehr Treibstoff wird für den Transport benötigt. Da Raketen aber sowieso zum größten Teil aus Treibstoff bestehen, geht eine Eröhung der Nutzlast zwangsläufig mit einer deutlichen Zunahme der Gesamtmasse der Rakete einher. Daraus wird ersichtlich, dass wohl auch bei zukünftigen Raketentypen die Nutzlast nicht beliebig vergrößert werden kann.

Ein Raketenantrieb beruht auf dem Newton'schen Pinzip von actio und reactio (Kraft und Gegenkraft). Der Treibstoff wird im Raketentriebwerk verbrannt und als Gas ausgestoßen. Die Kraft, mit der dieser Materieausstoß erfolgt, bewirkt eine Gegenkraft auf die Rakete. Durch diesen Rückstoß wird sie in entgegengesetzter Richtung beschleunigt.

Man kann jedoch auch mit dem Impulserhaltungssatz argumentieren: Der ausgestoßene Treibstoff bewirkt eine Änderung des Impulses. Da der Gesamtimpuls aber erhalten bleiben muss, ist eine Kompensation dieser Impulsänderung notwendig. Das geschicht dadurch, dass die Rakete ebenfalls eine Impulsänderung erfährt und zwar entgegengesetzt zu der Richtung der ausgestoßenen Antriebsgase.

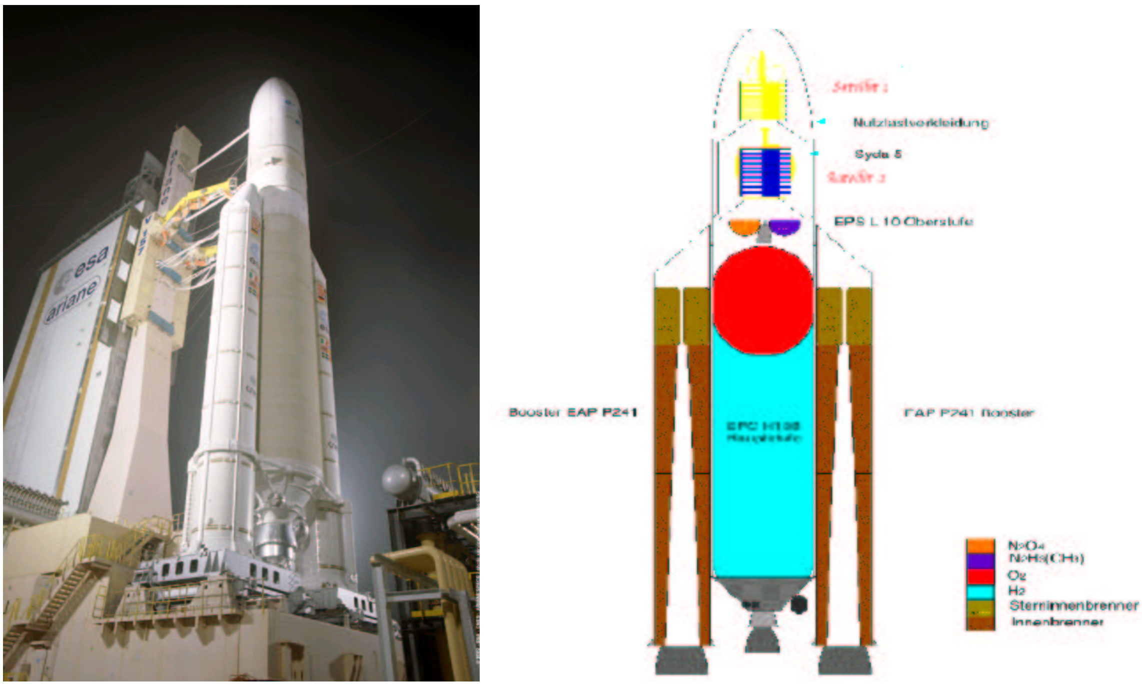

Abbildung 2: Links: Die europäische Rakete Ariane 5 (Bild: ESA). Rechts: Schnittbild einer Ariane 5 GS. Wie alle Raketen besteht auch sie überwiegend aus Treibstoff. Ihre verschiedenen Bestandteile sowie die unterschiedlichen Treibstoffarten sind farblich gekennzeichnet (Bild: Wikipedia.org).

Bei der folgenden Betrachtung wird nur die Anziehungskraft der Erde berücksichtigt. Bremsende Wirkungen aufgrund der Erdatmosphäre werden vernachlässigt. Eine Rakete, die zu Beginn ruht, kann nach Brennschluss ihres Triebwerkes theoretisch die Endgeschwindigkeit v_E erreichen:

$$v_\mathrm{E} = v_0 \cdot \ln \frac{m_0}{m_E} \qquad (Raketengleichung) \tag{1}$$

(m_0: Masse der Rakete beim Start, m_e: Masse der Rakete bei Brennschluss, v_0: Ausstoßgeschwindigkeit der Verbrennungsgase). Aus der Gleichung folgt, dass das Verhältnis zwischen Anfangs- und Endmasse möglichst groß sein sollte, damit die Rakete eine hohe Endgeschwindigkeit v_E erreicht. Man verwendet deshalb mehrstufige Raketen. Die einzelnen Raketenstufen werden nacheinader gezündet. Erst wenn eine Stufe ihren Brennschluss erreicht hat und der leere Behälter abgeworfen worden ist, wird die nächste Stufe gezündet.

Als Raketentreibstoff verwendet man üblicherweise Gemische aus Brennstoff und Oxidationsmittel. Die Brennwerte dieser Treibstoffgemische liegen im Bereich zwischen 2000 und 3000 cal/g. Die Verbrennungsgase können daher Ausstoßgeschwindigkeiten von etwa $v_\mathrm{E} = 4\,\mathrm{km/s}$ erreichen.

Aufgabe:

Berechnen Sie mit Hilfe der Raketengleichung die Endgeschwindigkeit einer einstufigen Rakete. Das Verhältnis ihrer Anfangs- und Endmasse sei $m_0/m_\mathrm{E} = 10$. Die Verbrennungsgase sollen mit einer Geschwindigkeit v_E von 4 km/s ausgestoßen werden. Kann man mit dieser Rakete die Fluchtgeschwindigkeit von $11,2\,\mathrm{km/s}$ erreichen, um das Schwerefeld der Erde zu verlassen? Falls nein, wie kann man die Leistungsfähigkeit einer Rakete erhöhen?

Lösung:

Die einstufige Rakete erreicht eine Endgeschwindigkeit v_E von lediglich $9,2\,\mathrm{km/s}$. Da die Fluchgeschwindigkeit aber $11,2\,\mathrm{km/s}$ beträgt, kann man mit dieser Rakete die Erdanziehung nicht überwinden. Für die eigentliche Weltraumfahrt verwendet man daher mehrstufige Raketen.

3 Neuentwicklung statt Nachbau

Astronomische Gerätschaften und Teleskope auf der Erde, aber auch auf Satelliten im Weltraum sind oft schon veraltet, wenn sie in Betrieb gehen. Dies liegt daran, dass derartige Projekte meist nur innerhalb eines sehr langen Zeitraums geplant und umgesetzt werden können. Sobald die technischen Vorgaben einmal festgelegt sind, kann am Design der Geräte und damit bei den zu verwendenden Bauteilen grundlegend nichts mehr geändert werden.

Bis die Gerätschaften schließlich gebaut sind, gehen nochmals mehrere Jahre ins Land. Da die Entwicklung von Computerbauteilen und Werkstoffen in der Zwischenzeit aber unaufhaltsam voranschreitet, muss ein gerade in Planung oder im Bau befindliches astronomisches Gerät auf einem technischen Stand bleiben, der schon ettliche Jahre zurückliegen kann. In der Regel fängt man daher bei der Fertigstellung eines Geräts gleich an, den Nachfolger zu planen. Dies ist dann zum großen Teil wieder eine Neuentwicklung, weil sich die technischen Voraussetzungen in der Zwischenzeit verändert haben.

Dasselbe gilt auch für Raketen oder Raumschiffe wie das Space Shuttle. Da auch diese nach einigen Jahren prinzipiell veraltet sind, ist es effektiver, mit aktueller Technik und besseren Werkstoffen neue Projekte zu planen.

Ein weiterer Grund dafür, dass zum Beispiel das Space Shuttle nicht einfach nachgebaut werden können, liegt darin, dass die entsprechenden Fertigungsanlagen nach einer gewissen Zeit nicht mehr existieren.

Abbildung 3: Das Space Shuttle beim Start (Bild: NASA).

4 Fluchtgeschwindigkeit

Um das Schwerefeld der Erde verlassen zu können, muss eine Rakete eine bestimmte Endgeschwindigkeit erreichen: die Fluchtgeschwindigkeit v_{F}. Sie hängt von der Masse und dem Radius der Erde ab. Wie groß die Fluchtgeschwindigkeit sein muss, kann man sich mit folgender Überlegung herleiten. Dabei sehen wir von weiteren Gravitationsfeldern (Sonne und Planeten) und vom Luftwiderstand in der Erdatmosphäre ab.

Wir betrachten ein radiales Gravitationsfeld, das von der Masse M erzeugt wird. Eine Masse m befinde sich in der Entfernung r vom Mittelpunkt dieses Feldes. Um die Masse m aus dem Gravitationsfeld "herauszubringen", muss man sie ins "Unendliche" überführen. Denn erst dort "endet" das von M erzeugte Schwerefeld. Hierzu muss man die Hubarbeit W verrichten:

$$W = G\frac{Mm}{r} \tag{2}$$

Die Gravitationskonstante G beträgt $6,673 \cdot 10^{-11}\mathrm{m}^3/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^2)$. Die Arbeit W wird in Form von potentieller Energie (E_{pot}) gespeichert, d.h. die potentielle Energie oder Lageenergie von m vergrößert sich. Wenn die "angehobene" Masse m (Rakete) auf die Masse M (Erde) zurückfällt, wird die gespeicherte potentielle Energie wieder frei. Die Hubarbeit und damit die potentielle Energie sind vom Weg, der beim Anheben zurückgelegt wurde, unabhängig. Das wird aus Gleichung 1 ersichtlich: W hängt nur von der Entfernung r der Masse m vom Mittelpunkt des Gravitationsfeldes ab.

Für die kinetische Energie oder Bewegungsenergie (E_{kin}), die die Masse m haben muss, um das Gravitationsfeld der Masse M zu verlassen und "im Unendlichen" zur Ruhe zu kommen, gilt gemäß Gleichung 1:

$$\frac{1}{2}\, m v_{\mathrm{F}}^2 = W = G\frac{Mm}{r} \tag{3}$$

Die Geschwindigkeit v_{F} steht dabei für die Fluchtgeschwindigkeit. Wir lösen die Gleichung nach v_{F} auf und erhalten so einen Ausdruck für die Fluchtgeschwindigkeit:

$$v_{\mathrm{F}} = \sqrt{2}\,\sqrt{G\frac{M}{r}} \tag{4}$$

Da die Hubarbeit vom Weg unabhängig ist, könnte man eine Rakete auch tangential zur Erdoberfläche mit der Fluchtgeschwindigkeit v_{F} abschießen. Sie hätte dann auch die kinetische Energie $E_{\mathrm{kin}} = \frac{1}{2}\, m v_{\mathrm{F}}^2$ und würde im Unendlichen folglich ebenfalls zur Ruhe kommen. Ihre kinetische Energie wäre im Unendlichen also gleich null ($E_{kin} = 0$). Da sich sich dann außerhalb des Gravitationsfeldes und damit außerhalb der Anziehungskraft der Erde befände, wäre ihre potentielle Energie auch gleich null ($E_{\mathrm{pot}} = 0$). Für ihre Gesamtenergie E im Unendlichen würde folglich ebenso gelten:

$$E = E_{\mathrm{kin}} + E_{\mathrm{pot}} = 0 \tag{5}$$

Ein Körper, der tangential zur Erdoberfläche abgeschossen wird und die in Gleichung 4 zum Ausdruck kommende Bedingung im Unendlichen erfüllt, bewegt sich exakt mit der Fluchtgeschwindigkeit v_F und beschreibt eine Parabelbahn. Man nennt v_F auch parabolische Geschwindigkeit oder Entweichgeschwindigkeit. Würde man den Körper mit einer Geschwindigkeit abschießen, die größer als die Fluchtgeschwindigkeit ist, hätte er im Unendlichen immer noch kinetische Energie und würde sich auf einer Hyperbelbahn bewegen. Wäre die Abschussgeschwindigkeit kleiner als v_F, könnte er die Anziehungskraft der Erde nicht überwinden und würde auf einer Ellipsenbahn um die Erde laufen.

Wir betrachten nun einen Satelliten, der die Erde in unmittelbarer Nähe auf einer Kreisbahn umläuft. Die Kraft, die dafür sorgt, dass der Satellit auf seiner Bahn bleibt, ist die Zentripetalkraft F_Z:

$$F_\mathrm{Z} = \frac{m\,v_K^2}{r} \tag{6}$$

Der Satellit muss sich mit der Kreisbahngeschwindigkeit v_K bewegen. Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ist F_Z immer auf den Kreismittelpunkt (in unserem Falle auf den Erdmittelpunkt) gerichtet. Man kann die Zentripetalkraft daher mit der Gravitationskraft F_G

$$F_\mathrm{G} = G\frac{Mm}{r^2} \tag{7}$$

gleichsetzen. In der Formelsprache heißt das:

$$\frac{m\,v_K^2}{r} = G\frac{Mm}{r^2} \tag{8}$$

Wenn man diese Gleichung nach v_K auflöst, kann man für die Kreisbahngeschwindigkeit folgenden Ausdruck ableiten:

$$v_\mathrm{K} = \sqrt{G\frac{M}{r}} \tag{9}$$

Der Vergleich mit Gleichung 3 zeigt, dass sich die Fluchtgeschwindigkeit und die Kreisbahngeschwindigkeit nur um einen Faktor $\sqrt{2}$ unterscheiden. Würde man eine Rakete mit der Geschwindigkeit v_K tangential zur Erdoberfläche abschießen, so würde sie die Erde für immer und ewig umkreisen.

Fragen:

1. Wie groß ist die Arbeit, die man verrichten muss, um einen Satelliten der Masse $m = 1000\,\mathrm{kg}$ von der Erdoberfläche ($r_\mathrm{Erde} = 6370\,\mathrm{km}$, $M_\mathrm{Erde} = 5{,}973 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}$) ins "Unendliche" zu transportieren, also dem Gravitationsfeld der Erde zu entziehen?

2. Wie groß ist die Fluchtgeschwindigkeit v_F auf der Erde?

3. Wodurch unterscheiden sich die Fluchtgeschwindigkeit v_F und die Kreisbahngeschwindigkeit v_K voneinander?

4. Wie groß ist die Kreisbahngeschwindigkeit v_K in unmittelbarer Erdnähe?

5. Ein Meteor, der sich im fernen Weltraum in Ruhe befindet, wird vom Gravitationsfeld der Erde eingefangen und bewegt sich auf diese zu. Mit welcher Geschwindigkeit wird er auf dem Erdboden aufschlagen? (der Luftwiderstand in der Erdatmosphäre ist zu vernachlässigen.)

6. Wie groß ist die Fluchtgeschwindigkeit v_F, die ein Körper erreichen muss, um das Sonnensystem zu verlassen? Es gibt zwei Möglichkeiten, um v_F zu berechnen. Welche sind das? ($M_\mathrm{Sonne} = 1,989 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$, $r_\mathrm{Erde-Sonne} = 150 \cdot 10^9\,\mathrm{m}$, $v_K^\mathrm{Erde} = 30\,\mathrm{km/s}$)

7. Welche Bahnen beschreiben Erdsatelliten im Allgemeinen?

8. Was versteht man unter einer geostationären Bahn?

Antworten:

1. Zum Transport des Satelliten benötigt man die Arbeit $W = 6,257 \cdot 10^{10}$ J.

2. Auf der Erde beträgt die Fluchtgeschwindigkeit $v_\mathrm{F} = 11,2\,\mathrm{km/s}$.

3. Durch den Faktor $\sqrt{2}$.

4. Es gilt: $v_K = v_\mathrm{F}\,/\sqrt{2}$. In unmittelbarer Erdnähe beträgt die Kreisbahngeschwindigkeit folglich $v_\mathrm{K} = 7,9\,\mathrm{km/s}$.

5. Da sich der Meteor zunächst in Ruhe ($E_\mathrm{kin} = 0$) und außerhalb des Schwerefeldes der Erde ($E_\mathrm{pot} = 0$) befindet, gilt die Überlegung zur Fluchtgeschwindigkeit – nur "rückwärts". Der Meteor schlägt folglich mit $11,2\,\mathrm{km/s}$ auf der Erdoberfläche auf.

6. In diesem Fall wird das zu betrachtende Gravitationsfeld von der Sonne erzeugt. Man benutzt Gleichung 3, die Definition der Fluchtgeschwindigkeit, und setzt für M die Masse der Sonne und für r den Abstand Erde – Sonne ein. Alternativ kann man Gleichung 8 in Gleichung 3 einsetzen und für die Kreisbahngeschwindigkeit v_K die Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne verwenden. Als Ergebnis für die zu berechnende Fluchtgeschwindigkeit erhält man: $v_\mathrm{F} = 42\,\mathrm{km/s}$.

7. Ellipsenbahnen

8. Ein Satellit, der sich auf einer geostationären Bahn befindet, umläuft die Erde in der selben Zeit, in der diese sich einmal um sich selbst dreht. Von der Erde aus gesehen, bleibt er also immer an derselben Stelle am Himmel stehen.

5 Rotverschiebung

Edwin Hubble entdeckte bereits in den 1920er Jahren, dass das Licht sehr weit entfernter Galaxien zu niedrigeren Frequenzen ν bzw. zu größeren Wellen λ hin verschoben ist. Diese Verschiebung ist umso größer, je weiter die beobachteten Galaxien von uns entfernt sind. Sie wird durch die Expansion des Universums hervorgerufen.

Die Rotverschiebung hat zur Folge, dass wir das eigentlich zum ultravioletten oder optischen Spektralbereich gehörende Licht dieser fernen Galaxien nur im Infraroten beobachten können. Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Abb. 4) schließt sich an das rote Ende des optischen Spektralbereichs an und ist für unsere Augen nicht mehr wahrnehmbar. Wir können es aber mit Infrarotkameras fotografieren und daher trotzdem erforschen.

Wie weit das Licht in die angrenzenden Spektralbereiche verschoben ist, wird mit Hilfe des Rotverschiebungsparameters z gemessen. Er ist folgendermaßen definiert:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \tag{10}$$

Diese Gleichung lässt sich umformen zu:

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \qquad \text{bzw.} \qquad \lambda_0 = \frac{\lambda}{z+1} \qquad \text{bzw.} \qquad \lambda = \lambda_0(z+1) \tag{11}$$

Mit λ_0 bezeichnet man die unverschobene Wellenlänge, die man im Labor messen würde. Dagegen gibt λ die tatsächlich gemessene, verschobene Wellenlänge an.

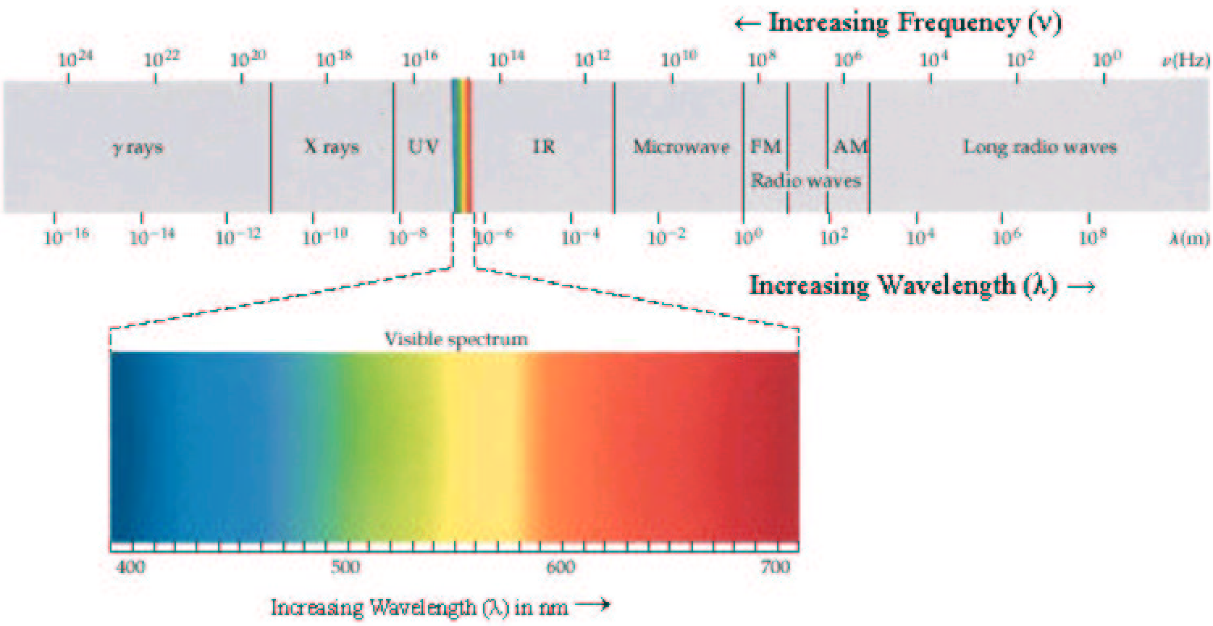

Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum (Bild: Wikipedia.org)

Aufgabe:

1. Licht mit der Laborwellenlänge $\lambda_0 = 500\,\mathrm{nm}$ sei um $z = 4,5$ ins Rote verschoben. Welche Wellenlänge λ würde man messen? ($1\,\mathrm{nm} = 1\,\mathrm{Nanometer} = 1 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}$)

2. Wir messen Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10\,500\,\mathrm{nm}$. Die entsprechende Laborwellenlänge beträgt dagegen nur $\lambda_0 = 875\,\mathrm{nm}$. Wie stark ist die Rotverschiebung?

Lösung:

1. Der gemessene Wert beträgt $\lambda = 2750\,\mathrm{nm}$

2. Das Licht ist um $z = 11$ rotverschoben.